

고속철도 교량상의 장대레일 축력 해석 Longitudinal Force Analysis of CWR on High Speed Rail Bridges

이 지 하* 양 신 추** 이 종 득***
Lee, Jee-Ha Yang, Sin-Chu Lee, Jong-Duk

ABSTRACT

Railway bridges have a significant effect on the stress and displacement of continuous welded rail(CWR). Longitudinal compression force at high temperature, combined breaking or acceleration forces can introduce track buckling. On the other hand, longitudinal tensile forces, associated with low temperatures, in combination with breaking forces may break rail. Therefore, it is very important to work out thorough counter measures for those problems, specially in high speed rail which high safety is required. The exact evaluation of longitudinal force of rail has the key to the solution.

The main aim of the present paper is to examine whether the longitudinal force of CWR's on Kyung-Bu-HSR satisfy the criteria to be fulfilled in the design of railway bridge. The analyses are carried out by using "CWRAP" program which was developed by our research group. The ballast resistance and breaking force effects on the longitudinal force of CWR are investigated.

1. 서 론

교량상의 장대레일은 온도변화가 발생할 경우 교량상판의 움직임으로 인하여 토공 또는 터널 구간에 비하여 과대한 응력과 변위가 유발된다. 이러한 영향은 교량상판의 길이가 클 수록 더욱 커져 레일은 허용축력을 초과하게 되며 심한 경우는 레일이 장출되거나 파단하는 경우도 발생하게 된다. 장대레일의 축력은 교량길이, 상판길이, 교각강성, 교좌장치 배치, 도상저항력, 열차시/제동하중, 신축이음부의 배치 등에 영향을 받기 때문에 교량구간을 장대화하기 위해서는 궤도 및 구조물 양면에서 설계시 충분한 검토가 있어야 한다. 특히 고속철도의 경우 제동하중은 기존철도에 비하여 크게 되므로 궤도축력이 크게 발생할 수 있으며, 레일 파단시 열차탈선의 위험이 크므로 교량구간 장대레일 부설시 특별한 주의가 필요하다. 이러한 위험성에 대비하기 위하여 외국의 경우는 교량구간을 장대화할 때에 열차의 운영속도, 교량길이, 교량상판길이, 교좌장치 배치 방법 등으로 구분된 세부기준을 두고 있다.

본 논문에서는 교량구간의 궤도축력을 해석하기 위하여 개발된 프로그램(CWRAP)[1]을 사용하여 경부고속철도 교량구간의 궤도축력에 대한 안전성을 검토하였다. 고속철도 교량구간의 축력에 대한 세계 각국의 기준을 조사한 다음, 궤도축력 해석결과가 이들을 만족하는가를 비교 검토하였다. 또한 국내에서 정확하게 정립되어 있지 않은 궤도복진저항력, 제동하중에 대하여 합리적 범위의 최대, 최소값을 사용하였을 때에 궤도축력에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 교량상의 궤도축력 해석

레일에 작용하는 종방향 저항력은 침묵간격으로 이산되어 작용하나 이들을 해석하기 위해서는 그림 1과 같이 등분포되어 있는 스프링으로 모형화할 수 있다. 기존의 연구에서는 스프링의

* 정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원,

** 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

*** 정회원, 국립철도전문대학 교수

물성을 주로 탄성 또는 소성으로 이상화하여 해석하였으나 실제 측정에 의하면 저항력은 그림 3의 점선과 같은 비선형 특성을 보이므로 보다 정확하게 해석하기 위해서는 이러한 비선형특성이 해석에 반영되어야 할 것이다. 교량상의 프로그램 'CWRAP'는 스프링의 물성을 그림 3의 실선과 같이 탄소성으로 이상화함으로써 이러한 비선형특성을 고려할 수 있도록 개발된 궤도축력 해석프로그램이다.

마찰력이 탄성영역을 넘어 소성상태에 있는 경우는 마찰력을 유발하는 외력이 제거되더라도 원래의 상태로 복귀하지 않는다. 이러한 비선형성에 의하여 레일의 변위와 마찰력은 하중이력에 따라 다르게 거동하므로 열하중과 같이 단계적으로 작용하는 하중의 경우는 그에 대한 영향을 고려하여 해석하여야 한다[3]. 따라서 본 연구에서는 현장에서 발생하는 실질적인 궤도축력을 구하기 위하여 하중이 3 단계로 나누어 재하되는 것으로 가정하여 해석하였다.

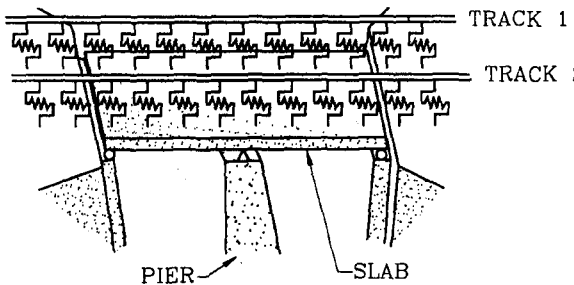


그림1. 레일에 작용하는 마찰저항을 모형화하기 위한 스프링요소

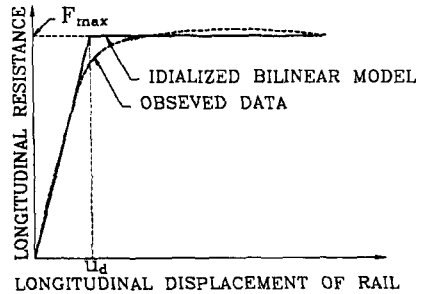


그림2. 궤도의 종방향 저항력의 쌍일차(Bilinear) 모형

즉, 첫 번째 단계에서는 대기온도 변화에 의하여 레일의 온도가 변화함으로써 궤도에 열하중이 가해지고, 다음 단계에서는 교량이 온도변화하므로 열하중이 교량에 작용되며, 마지막 단계에서는 열차가 교량상에서 급하게 제동함으로써 차륜과 레일 사이의 마찰에 의한 제동하중이 궤도에 작용되는 것으로 가정한다.

개발된 프로그램의 검증용 위하여 프랑스 릴(Lille)과 벨기에의 부뤼셀(Brussele)을 잇는 고속철도 선상에 있는 교량(그림3)에 대하여 델프트공대 팀에 의해 개발된 PROLIS20[2]프로그램으로 해석한 결과와 CWRAP프로그램으로 해석한 결과를 비교한 결과(그림4) 두 해석결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.

표 1. 궤도상태 및 하중조건에 따른 각각의 해석방법

Case I	궤도가 열하중을 받은 후 교량이 열하중을 받은 경우(열차 제동하중이 없는 상태)
Case II	교량 6번 상판의 좌측 물리 지점으로부터 좌측 방향으로 75m 활동체결구를 사용한 경우(열차 제동하중이 없는 상태)
Case III	교량 6번 상판의 좌측 물리 지점으로부터 좌측 방향으로 75m 활동체결구를 사용할 때 궤도 한쪽에서 길이 400m의 열차 제동하중이 작용한 경우

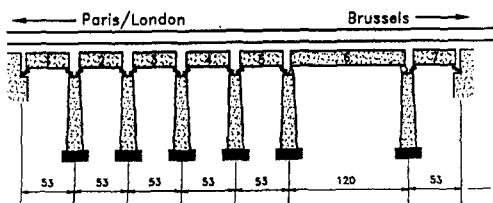
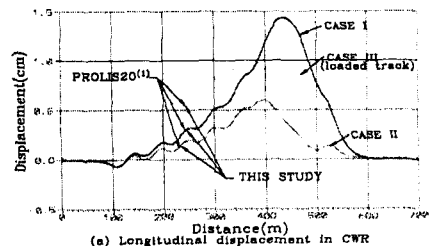
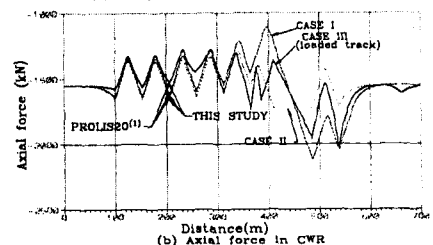


그림3. 궤도축력 해석모형



(a) Longitudinal displacement in CWR



(b) Axial force in CWR

그림4. 열하중 및 제동하중에 대한 궤도의 방향 변위 및 축력

3. 궤도축력 허용기준, 도상종저항력, 제동하중

3.1 궤도축력 허용 기준

교량상의 장대레일 설계에 있어서 검토해야할 사항은 레일의 허용인장 및 압축력, 레일파단시 개구량, 신축이음매의 허용스트로크 등 3가지이다[6].

레일의 허용압축력에 대하여서는 좌굴을 유발하지 않을 한도이며, 허용인장력은 용접부가 파단되지 않을 한도이다. 그러나 용접기술의 발달로 용접부 인장강도가 모재의 인장강도에 접근하므로 레일의 허용인장력은 좌굴을 유발하지 않을 압축력에 비하여 크게되므로 보통은 압축력만을 검토한다. 레일 압축력은 일본의 경우 60kg 레일에 대하여 궤도(2레일)당 200ton(2,000kN)을 기준으로 검토한다. 또한 파단시 개구량은 「전국신간선망건조물설계표준」에 의하면 60kg 레일에 대하여 69mm로 정하고 있다[5]. 본 연구에서는 교량상에 별도의 신축이음매를 두지 않는 것으로 보고 장대레일 축력허용기준을 일본의 경우와 동일하게 축력은 궤도당 2,000kN을, 파단시 개구량은 69mm를 기준으로 궤도축력을 검토하였다.

3.2 도상종저항력

레일의 종방향의 이동에 저항하는 힘을 일반적으로 크리프저항이라 한다. 장대레일구간의 궤도구조에서는 PC침목을 사용하고 2중탄성체결을 사용하고 있지만 침목과 레일간의 크리프저항이 침목과 도상간의 이동저항보다 크기 때문에 레일의 신축에 대한 저항력은 도상과 침목의 이동저항력에 지배를 받게 된다[4]. 도상종저항력의 최대치(일정치)는 도상체결상태, 침목부설경년 등에 의해 다르지만 신간선에서는 10kN/m/레일, 레일변위와 저항력의 관계에 있어서는 저항력이 일정하게 되는 점의 이동량(한계이동량 U_0)는 3~5mm이다[7]. 또한, 궤도보수 직후 도상저항력은 50~60%정도 감소하는 것으로 보고 있다. 프랑스의 경우는 60kg레일을 사용하는 궤도에 있어서 보수 직후 불안정한 궤도에 대해서는 5kN/m/레일, 안정화된 궤도에 대해서는 12kN/m/레일을 적용하고 있다.

본 연구에서는 도상저항력이 5kN/m/레일인 경우와 12kN/m/레일인 두 가지 경우에 대하여 검토하였다. 이때 한계이동량은 2mm로 가정하였다.

3.3 제동하중

열차제동하중은 국내 고속철도시방서의 경우는 2ton/m/궤도로 정하고 있지만 프랑스 릴(Lille)과 벨기에의 브뤼셀(Brussele)을 잇는 고속철도 교량에서는 제동하중을 8kN/m/궤도로 보고 축력을 해석하였다. 본 연구에서는 상기 두 가지 제동하중에 대하여 궤도축력을 검토하였다.

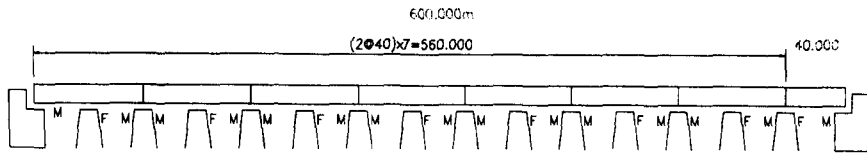
4. 경부고속철도 교량의 궤도축력 해석

표 2. 궤도와 교량의 물성

레 일	단면적	$A=15,380\text{mm}^2$ (2xUIC60)
	탄성계수	$E=210\text{kN/mm}^2$
	열팽창계수	$\alpha=1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	온도변화	$\Delta T=+45 \text{ } ^\circ\text{C}$
자갈도상 및 궤 도	최대 마찰력	$\phi_{\max}=10\text{kN/m}, 24\text{kN/m}$
	한계변위	$U_0=2\text{mm}$
교 량	탄성계수	$E=34.75\text{kN/mm}^2$
	열팽창계수	$\alpha=1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	온도변화	$\Delta T=+30 \text{ } ^\circ\text{C}$
열 차	제동하중	$F_{\text{brk}}=8\text{kN/m/track}, 20\text{kN/m/track}$ (단선 400m에 작용)

본 연구에는 경부고속철도구간에 있는 10개의 교량(표2, 4)에 대하여 궤도축력을 검토하였다. 그림 5a는 송라교의 상판길이 및 교좌장치 배치방법을 나타낸 것이며, 5b는 본 프로그램에서의 해석모델을 나타낸 것이다.

그림 6에서 1, 2열은 도상저항력이 궤도당 각각 0.24, 0.10kN/m인 경우에 대하여 제동하중이 가해지기 전 온도변화만에 의하여 궤도에 발생하는 축력을 나타낸 것이고, 3, 4열은 교량과 궤도가 온도변화한 후 제동하중이 궤도당 각각 8, 20kN/m작용하는 경우에 대한 궤



(a). 상판길이 및 교좌장비 배치현황

레일1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
레일2	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
교량	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
교각		52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	

(b) 해석모형

그림5. 송라교의 현황 및 궤도축력 해석모형

도 축력을 나타낸 결과이다. 이들 결과로부터 궤도축력은 대부분의 교량에서 교량 단부에서 최대치가 발생하나 교량의 상판길이가 달라지거나 교좌장치의 고정 및 이동방식이 달라지는 점에서도 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 궤도축력은 도상저항력이 적은 경우 궤도 종방향에 따라 그 변화가 적고 따라서 최대값도 적음을 알 수 있다. 표 3은 그림6의 각각의 경우에 대한 궤도축력의 최대값을 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 제동하중이 작용하지 않더라도 도상저항력이 궤도당 0.24kN/m인 경우에는 최소 111.5kN에서 최대 316.2kN까지 초과함을 알 수 있으며, 도상저항력이 궤도당 0.1kN/m인 경우에는 이 보다는 초과량이 적으나 대부분 기준을 상회함을 알 수 있다. 제동하중이 작용하는 경우는 온도변화만을 고려한 경우보다 궤도축력이 훨씬 증가함을 알 수 있다. 도상저항력 및 제동하중에 따른 궤도축력의 변화를 살펴보면 도상저항력이 궤도당 0.24kN/m인 경우가 0.10kN/m 경우 보다 평균 259kN 증가함을 알 수 있고, 제동하중이 20.0kN/m인 경우가 8.0kN/m인 경우 보다 평균 70kN 증가함을 알 수 있다. 또한 제동하중이 작용하지 않는 경우와 작용하는 경우의 궤도축력은 제동하중 20.0kN/m인 경우 140kN이, 제동하중 8.0kN/m인 경우는 70kN이 증가함을 알 수 있다.

레일의 파단시 개구량이 허용기준을 만족하는가를 검토하기 위하여 앞에서의 해석에서 얻어진 레일최대 변위 지점을 임의로 파단시켜 개구량을 산정하여 보았다. 도상저항력 및 제동하중은 앞서 검토한 궤도축력해석과 동일한 경우들에 대하여 검토하였다.

그림7에서 1, 2열은 도상저항력이 궤도당 각각 0.24, 0.1kN/m인 경우에 대하여 제동하중이 가해지기 전 온도변화만에 의하여 파단이 있는 궤도에 발생하는 레일변위를 나타낸 것이고, 3, 4열은 교량과 궤도가 온도 변화한 후 제동하중이 궤도당 각각 8, 20kN/m 작용하는 경우에 대한 레일변위를 나타낸 결과이다. 이들 결과로부터 레일 파단시 개구량은 도상저항력이 작은 경우 (0.1kN/m/궤도) 크게 발생함을 알 수 있으며 제동하중의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 표 5는 그림7의 각각의 경우에 대한 개구량의 최대값을 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 제동하중이 작용하지 않을 때 도상저항력을 궤도당 0.24kN/m로 할 경우에는 모든 교량에서 개구량은 허용한도인 69mm 이내로 기준을 만족함을 알 수 있다. 그러나 도상저항력을 0.10kN/m으로 할 경우에는 모든 교량에서 허용기준을 초과(최소 4mm, 최대 53mm)함을 알 수 있다. 제동하중을 고려하는 경우는 그 영향이 심각함을 알 수 있으나 제동하중의 크기에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

그림 6. 고속철도 교량의 축력해석 결과(레일파단이 없는 경우)

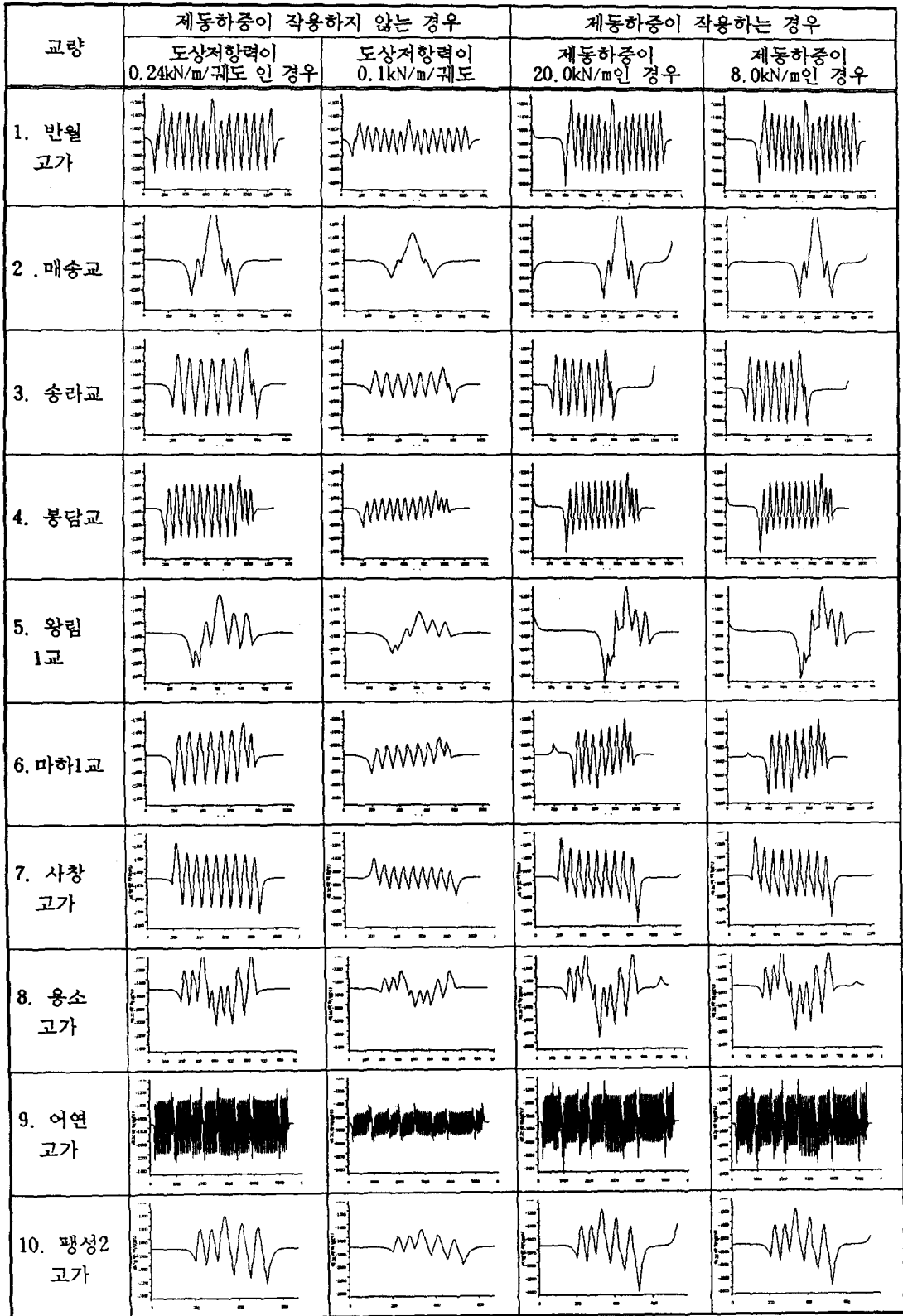


그림 7. 레일과단시 궤도축력에 따른 레일변위

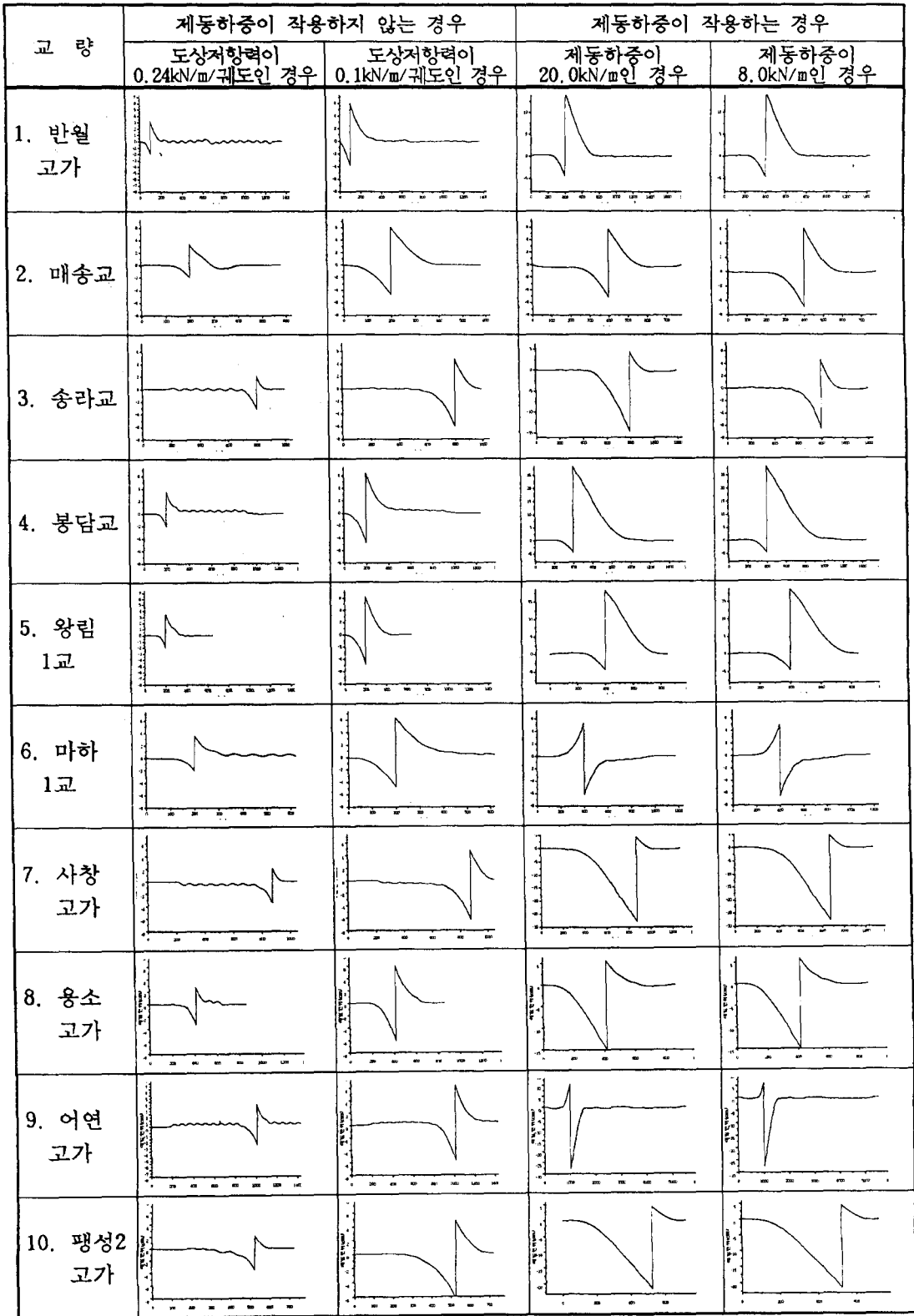


표 4. 레일파단이 없는 경우 축력의 최대값(kN)

교 량	제동하중이 없는 경우		제동하중이 작용하는 경우	
	도상저항력이 0.24kN/m/궤도인 경우	도상저항력이 0.1kN/m/궤도인 경우	제동하중이 20.0kN/m인 경우	제동하중이 8.0kN/m인 경우
1. 반월고가	2268.4	2012.8	2444.8	2378.7
2. 매송교	2293.5	2009.7	2378.7	2302.2
3. 송라교	2268.4	2012.7	2296.8	2275.7
4. 봉담교	2287.4	2028.4	2429.0	2373.5
5. 왕립1교	2270.4	2057.1	2526.3	2459.0
6. 마하1교	2287.4	2028.3	2277.9	2275.9
7. 사창고가	2287.4	2028.4	2454.0	2383.5
8. 용소고가	2111.5	1847.6	2334.9	2250.2
9. 어연고가	2316.2	2044.2	2479.0	2298.0
10.팽성2고가	2286.4	2022.2	2451.8	2381.5

표 5. 레일파단시의 개구량 최대값 (단위:cm)

교 량	제동하중이 없는 경우		제동하중이 작용하는 경우	
	도상저항력이 0.24kN/m/궤도인 경우	도상저항력이 0.1kN/m/궤도인 경우	제동하중이 20.0kN/m인 경우	제동하중이 8.0kN/m인 경우
1. 반월고가	5.272	9.875	19.1508	19.3908
2. 매송교	5.394	9.262	11.0147	11.1083
3. 송라교	5.274	8.011	19.0507	11.1894
4. 봉담교	5.606	11.175	32.7888	33.0288
5. 왕립1교	5.561	11.049	23.0118	23.2518
6. 마하1교	5.606	11.175	11.4551	11.5458
7. 사창고가	5.606	7.735	32.4088	32.6478
8. 용소고가	6.103	12.174	20.7439	20.9868
9. 어연고가	6.549	12.131	38.225	34.021
10.팽성2고가	5.605	11.154	25.7863	25.9283

6. 결 론

본 논문에서는 교량구간의 궤도축력을 해석하기 위하여 개발된 프로그램(CWRAP)[1]을 사용하여 경부고속철도 교량구간의 궤도축력에 대한 안전성을 검토하였다. 고속철도 교량구간의 축력에 대한 세계 각국의 기준을 조사한 다음, 궤도축력 해석결과가 이들을 만족하는가를 비교검토하였다.

부분의 교량에서 교량 단부에서 최대가 발생하나 교량의 상판길이가 달라지거나 교좌장치의 고정 및 이동방식이 달라지는 점에서도 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 궤도 축력은 도상저항력이 적은 경우 궤도 종방향에 따라 그 변화가 적고 따라서 최대값도 적음을 알 수 있었다. 제동하중이 증가할 경우 궤도축력이 증가하나 큰 영향을 주는 것은 아님을 알 수 있었다. 모든 교량에서 궤도축력이 허용기준인 2,000kN를 상회하고 있으므로 교량상의 궤도축력에 대하여 특별한 관리가 필요함을 알 수 있었다.

레일의 파단시 개구량이 허용기준을 만족하는가를 검토한 결과 레일 파단시 개구량은 도상저항력이 적은 경우 크게 발생함을 알 수 있으며 제동하중의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 제동하중이 작용하지 않을 때 도상저항력을 궤도당 0.24kN/m로 할 경우는 모든 교량에서 개구량은 허용한도 69mm 이내로 기준을 만족함을 알 수 있다. 그러나 도상저항력을 0.10kN/m으로 할 경우는 모든 교량에서 허용기준을 초과(최소 4mm, 최대 53mm)함을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 궤도유지보수 직후 도상저항력이 감소하는 시기에 궤도가 파단할 경우 열차탈선의 위험이 있으므로 주의를 기울일 필요가 있음을 알 수 있다.

이상에서의 교량상의 궤도축력 검토는 외국에서 측정한 도상저항력 및 제동하중을 바탕으로 이루어졌으므로 실제와는 다소 차이가 있는 평가가 이루어 졌을 수 있지만 많은 경우가 일본 신간선 궤도축력 허용기준을 다소 상회하는 등의 결과를 보이고 있어 경부고속철도에 적용할 궤도축력 허용기준에 대한 많은 연구가 뒤따라야 할 것이고 또한, 각각의 교량에 대하여 철저한 분석을 토대로 궤도축력에 대한 적절한 대책마련이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. 양신추, 이안호, 나성훈, 권영대, "교량상의 축력해석", 대한토목학회학술발표회의, 1997.10.
2. Ir. R.C.M. Delhez, Prof. Dr. Ir.C. Esveld, Ir. P. Godrt, and Ir. J. Mijs, "Avoidance of expansion joints in highspeed CWR track on long bridges", Rail Engineering International Edition 1995. Number 3.
3. Coenraad Esveld, "Modern railway track", MRT-Productions, 1989
4. Coenraad Esveld, "How safe is CWR", Word Congress on Railway Research Conference, 1996. 7.
5. 須田征男, 長門 彰, 徳岡研三, 三浦 重, "신선로-궤도의 구조와관리", 사단법인 일본철도시설협회, 1997.7
6. 大月 隆士, 櫻澤 正, "신궤도의 설계", 산해당, 신철도토목시리즈, 1983. 4
7. 松原 健太郎, "신간선의 궤도", 일본철도시설협회, 1979. 2
8. Coenraad Esveld, "A new set of computer models for analysing CWR", Word Congress on Railway Research Conference, Vol. B, FIRENZE 16-19, NOV. 1997. 7.